

Projekt Nr.: 262 104 99

Thema: Bewertung der Energieeffizienz verschiedener Maßnahmen für Gebäude mit sehr geringem Energiebedarf

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. F. D. Heidt

Anschrift: Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie
(Leitung: Prof. Dr.-Ing. F. D. Heidt)
Universität Siegen
D-57068 Siegen

T: +0271-740-3817
F: +0271-740-3820
heidt@physik.uni-siegen.de
<http://nesa1.uni-siegen.de>

Projektleiter: Dr. rer. nat. U. Gieseler, Prof. Dr.-Ing. F. D. Heidt

Förderzeitraum: 1.7.2000 bis 31.12.2004

Förderquote: 100 %

Abstract

Evaluation of the energy efficiency of various methods for very low-energy buildings

For the successful realisation of building concepts with high thermal comfort and very low energy consumption, energy saving methods have to be applied effectively. The key to achieve this within a realistic budget is a *quantitative* evaluation of methods with respect to energy efficiency. It is obvious, that the comparison of elements in different buildings is not appropriate, because differences in energy consumption can occur due to the actual realisations of the buildings or different user behaviour. The goal of this project is the development of a computer simulation for thermal behaviour of buildings. This approach provides the possibility to evaluate quantitatively energy-saving methods under fixed boundary conditions. In turn, the influence of the boundary conditions, like location, weather conditions and user profiles, can also be investigated. The essential data for a calibration of the simulation model has been collected within the previous project "Analysis of building energetics", which was also supported by the AG Solar. We have chosen two passive and two low-energy residential buildings, for which the modular simulation environment TRNSYS will be adapted. The calibrated computer models allow a detailed understanding of the data itself, and a quantitative evaluation of variations and supplements with respect to energy consumption and thermal comfort. The results will be made available in a suitable form for architects and building designers. This allows optimisation of energy consumption and investment costs of a building in the early design stage, under consideration of the thermal comfort of the building.

1 FuE-Aufgabe und Zielsetzung

Die erfolgreiche Umsetzung von Gebäudekonzepten mit hohem thermischen Komfort und geringem Energieverbrauch, in einem realistischen Finanzierungsrahmen, erfordert einen effektiven Einsatz von Maßnahmen zur Energieeinsparung. Der Schlüssel hierzu ist eine *quantitative* Bewertung dieser Maßnahmen bezüglich ihrer Energieeffizienz. Ein Vergleich der Ausführung eines Teilaspektes in verschiedenen realen Gebäuden kann jedoch nicht zu einer geeigneten Bewertung führen kann, da die Unterschiede der Gebäude i.A. sehr komplex sind und auch das Nutzungsverhalten zu großen Variationen im Energieverbrauch führen kann. Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung von Simulationen für das thermische Verhalten von Gebäuden, mit der durch Variationen von Teilaspekten unter sonst identischen Randbedingungen eine quantitative

Bewertung von verschiedenen Maßnahmen zur Energieeinsparung möglich ist. Ebenso kann der Einfluss der Randbedingungen wie Lage, Wetterdaten und Benutzerprofile beurteilt werden. Die zur Simulations-Kalibrierung notwendigen detaillierten Messdaten sind durch das Projekt „Energetische Diagnose von Gebäuden“ bereitgestellt worden. Aus dieser Datenbank sind zwei Niedrigenergie- und zwei Passivhäuser verschiedener Gebäudetypologien (Ein- und Mehrfamilienhäuser) ausgewählt worden, die sich aufgrund ihrer Energiekennzahlen für den Nachbau und für die Weiterentwicklung oder Modifikation empfehlen:



Objekt 1: Das Niedrigenergiehaus (NEH) in **Essen-Kraienbruch** ist ein dreigeschossiges Mehrfamilienhaus (MFH, 6 Wohnungen) in unterkellierter Massivbauweise (MBW) mit einer beheizten Nutzfläche von 403 m². Der berechnete flächenspezifische Heizwärmebedarf liegt bei ca. 81 kWh/(m²·a).



Objekt 2: Das Niedrigenergiehaus (NEH) in Wenden-**Hünsborn** ist ein 1½-geschossiges Einfamilienhaus (EFH) in nicht unterkellierter Leichtbauweise (LBW) mit einer beheizten Nutzfläche von 200 m². Der berechnete flächenspezifische Heizwärmebedarf liegt bei ca. 70 kWh/(m²·a).



Objekt 3: Das Passivhaus (PH) in Wenden-**Hillmicke** ist ein dreigeschossiges Mehrfamilienhaus (MFH) in Massivbauweise (MBW) mit einer beheizten Nutzfläche von 204 m². Der berechnete flächenspezifische Heizwärmebedarf liegt bei ca. 16 kWh/(m²·a) mit Baukosten in Höhe von 1670 DM/m² (DIN 276, Kostengruppen 300 + 400).



Objekt 4: Das Passivhaus (PH) in Lindlar-**Hohkeppel** ist ein zweigeschossiges Einfamilienhaus (EFH) in nicht unterkellierter Leichtbauweise (LBW) mit einer beheizten Nutzfläche von 163 m². Der berechnete flächenspezifische Heizwärmebedarf liegt bei ca. 15 kWh/(m²·a) mit Baukosten in Höhe von 2540 DM/m² (DIN 276, Kostengruppen 300 + 400).

Für diese Häuser wird jeweils ein thermisches Simulationsprogramm erstellt. Dazu wird das modular aufgebaute Simulationswerkzeug TRNSYS¹ verwendet, welches an das jeweilige Gebäude individuell angepasst werden kann. Ein kalibriertes Computermodell der ausgewählten Objekte ermöglicht nicht nur ein tiefes Verständnis für das Zustandekommen der Daten selbst, sondern darüber hinaus auch eine quantitative Bewertung von Variationen oder Ergänzungen in Hinblick auf den Energieverbrauch und den thermischen Komfort. Die zu untersuchende Gesamtheit der Parameter lässt sich gliedern in die Bereiche:

- Gebäudeentwurf,
- Haustechnik,
- Materialauswahl,
- Nutzerverhalten und Komfortanspruch,
- Heizungs- und Lüftungsregelung,
- Klimatische Einflüsse.

¹ Transient System Simulation (Version 14.2). University of Wisconsin, USA.

Zusätzlich können die Gebäude im Simulationsmodell durch verschiedene passiv-solare und aktiv-solare Komponenten ergänzt und bewertet werden.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen werden eingebracht im Task 28 des IEA-SHC-Programms² mit der Bezeichnung „Solar Sustainable Housing“. Außerdem werden diese für Architekten aufgearbeitet und in geeigneter Weise präsentiert und verbreitet. Dadurch werden Anwender ohne die Benutzung von eigenen Simulationswerkzeugen beim Gebäudeentwurf eine bestmögliche Optimierung bezüglich Energieverbrauch und Investitionskosten bei gleichzeitiger Sicherstellung des thermischen Komforts erreichen können.

2 Arbeitsprogramm

Für jedes der vier o.g. Objekte sind zum Erreichen des Gesamtzieles folgende Arbeiten durchzuführen:

Arbeitsabschnitt 1 – Erstellung und Kalibrierung der Simulationsmodelle

Die Grundlage hierfür bilden die im Rahmen des Projekts „Energetischen Diagnose von Gebäuden“ gemessenen Zeitreihen. Die den Nutzereinfluss beschreibenden Größen, wie Zeiten aktiver Verschattung, erhöhte oder verminderte Lüftung, starke Personenbelegung oder Urlaubsperioden sowie Variationen der Heizungsregelung sind in diesen Daten nicht enthalten. Diese müssen daher indirekt aus den Zeitreihen oder durch Befragung der Nutzer bestimmt werden. Die Methodik der Simulation ist in Grundzügen durch die zur Verfügung stehenden TRNSYS-Module und der Simulationsumgebung vorgezeichnet. Diese kann, bzw. muss, je nach Haustechnik, an jedes Gebäude individuell angepasst werden. Nach Vorgabe der Aufgabenstellung zielen die Ergebnisse der Simulationen auf Aspekte wie thermischer Komfort und Heizenergiebedarf. Eine Kalibrierung des Modells muss daher durch einen Vergleich von geeignet gewählten Parametern in Anlehnung an diese Zielgrößen erfolgen. Um eine größtmögliche Übereinstimmung von Messgrößen und Simulationsergebnissen zu erreichen, werden die Parameter des Modells innerhalb der physikalisch sinnvollen Bereiche variiert.

Arbeitsabschnitt 2 – Durchführung von Sensitivitätsanalysen

Die kalibrierten Simulationsmodelle werden dazu benutzt, Sensitivitätsanalysen hinsichtlich von Größen durchzuführen, die den Wärmehaushalt der vier Gebäude beeinflussen. Insbesondere die Anwendung der Simulationsumgebung TRNSYS ermöglicht eine sehr große Freiheit in der Auswahl der zu variierenden Größen, da das vollständige Simulationsprogramm im Quelltext vorliegt. Aus den Ergebnissen können Schlussfolgerungen wirtschaftlicher Art abgeleitet werden, da die Kalibrierung des Modells die Formulierung *quantitativer* Regeln ermöglicht.

Arbeitsabschnitt 3 – Modellerweiterung durch innovative Regelung und solare Komponenten

Die Simulationsmodelle werden durch Hinzunahme von Modulen erweitert. Diese Module können sowohl aus innovativen Regelungsalgorithmen für die Heizung (oder Kühlung) bestehen, als auch aus z.B. aktiven oder (weiteren) passiven solaren Komponenten. Hier kann das Einsparpotential verschiedener solcher Komponenten an einem Objekt unter sonst gleichen Randbedingungen quantitativ bewertet werden. Weiterhin kann die Effektivität dieser Komponenten im Kontext unterschiedlicher Haustypen und Randbedingungen untersucht werden.

Arbeitsabschnitt 4 – Aufbereitung ausgewählter Ergebnisse für den IEA-Task 28

Die Ergebnisse werden mit dem Ziel möglichst großer Verbreitung aufgearbeitet und präsentiert. Dazu wird insbesondere die Darstellung im Rahmen des IEA-SHC Task 28 beitragen.

² International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme.

3 Stand der Arbeiten und Ergebnisse

Arbeitsabschnitt 1 – Erstellung und Kalibrierung der Simulationsmodelle

Aus der Analyse der gemessenen Zeitreihen, insbesondere für die Zonentemperaturen, konnten wichtige Erkenntnisse bezüglich des Nutzerverhaltens gewonnen werden. Beispiele sind das Lüftungsverhalten, Urlaubsperioden sowie Zeiten starker interner Gewinne durch erhöhte Personenzahl oder Einsatz elektrischer Großgeräte. Diese Erkenntnisse für die Objekte 2, 3 und 4 wurden vor Ort durch eine Befragung der Bewohner verifiziert und erweitert. Für die vier Objekte sind detaillierte TRNSYS-Modelle mit 7 Zonen (Objekt 2), 8 Zonen (Objekt 1 und 3), bzw. 10 Zonen (Objekt 4) erstellt worden. Diese Anzahl ermöglicht, den Einfluss von Variationen auf den lokalen thermischen Komfort einzelner Stockwerke oder Zimmer zu bestimmen.

Die Kalibrierung aller 4 Gebäudemodelle ist abgeschlossen. Zum Objekt 2 (Hünsborn) soll hier exemplarisch ein Beispiel für den Erfolg der Anpassung präsentiert werden. In Abbildung 1 ist der simulierte (T_s) und gemessene Temperaturverlauf (T_m) für die Zone „Wohnen“ dieses Objekts dargestellt. Die Temperaturkurven zeigen eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Messung bei gleichzeitig stark variierendem Einfluss durch Solarstrahlung und Außentemperatur. Die Steuerung der Heizung wurde konsistent mit der tatsächlichen Einstellung gewählt, die in diesem Fall nicht über die Zimmertemperaturen geregelt worden ist, sondern ausschließlich über die Außentemperatur und mit Nachtabsenkung. Das ist die Ursache für den sinusförmigen Verlauf der Zonentemperatur.

Zusammenfassend sind in Tabelle 1 die Ergebnisse der Kalibrierung aller 4 TRNSYS-Modelle angegeben, mit jeweils dem in der Messung ermittelten Heizwärmebedarf und der prozentualen Abweichung des entsprechenden Wertes aus der Simulation. Die Differenz aus gemessener und simulierter Temperatur auf 15-Minuten-Basis ergibt näherungsweise eine Normalverteilung. Der Mittelwert der Verteilung und die Standardabweichung sind ebenfalls in Tabelle 1 angegeben.

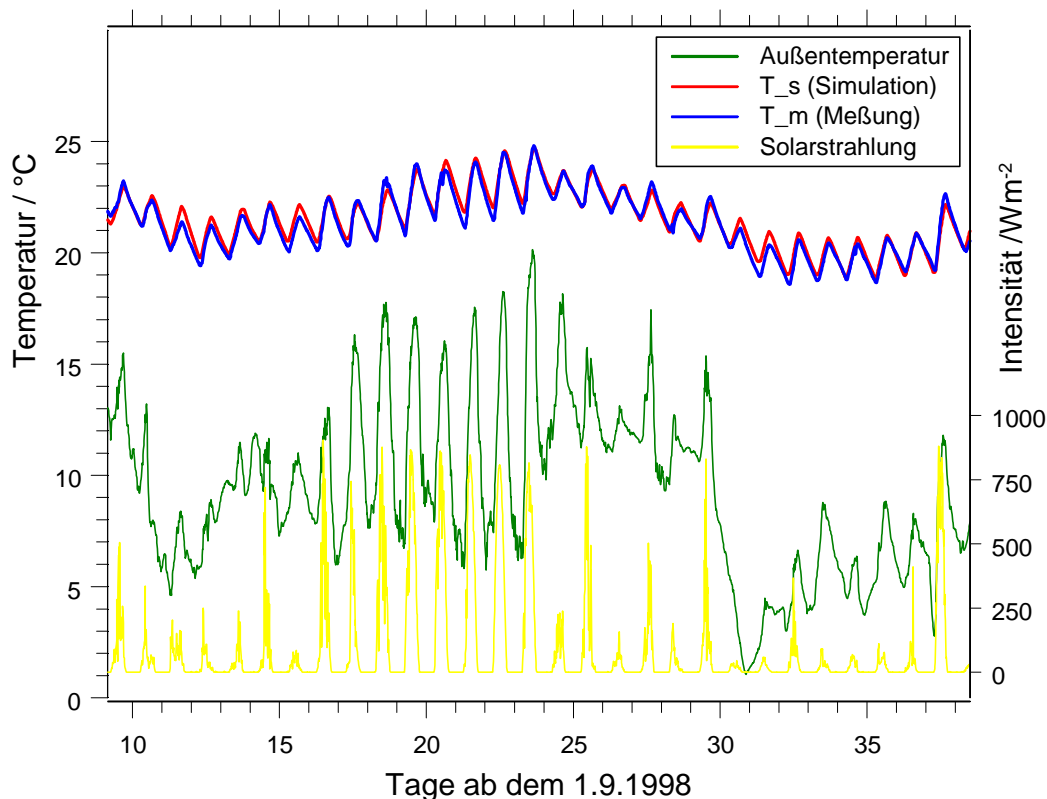


Abbildung 1: Simulierter und gemessener Lufttemperaturverlauf in der Zone „Wohnen“ im Objekt 2 für einen Zeitraum von 29 Tagen. Zusätzlich ist die Außenlufttemperatur und die Solarstrahlung auf die südliche Vertikale dargestellt.

Die Genauigkeit, mit der die Simulationsmodelle die Zonentemperaturen in 15-Minuten-Intervallen reproduzieren bzw. vorhersagen können, beträgt für die überwiegende Zeit 0,2 K bis 0,5 K. Dies ist die maximal zu erwartende Genauigkeit. Eine noch bessere Übereinstimmung wäre nur unter Berücksichtigung der exakten Lage und Installationsart der Temperatursensoren möglich, d.h. Berücksichtigung von Wandtemperatureinfluss und Stratifikation. Dies würde einen erheblichen, nicht gerechtfertigten, Mehraufwand bedeuten. Die Tabelle 1 zeigt, dass die Kalibrierung zu sehr realitätsnahen Simulationsmodellen geführt hat.

Tabelle 1: Werte für die Anpassung der TRNSYS-Simulation an die Messung.

	Objekt 1 Essen	Objekt 2 Hünsborn	Objekt 3 Hillmicke	Objekt 4 Hohkeppel
Anpassungszeitraum	06.01.98 - 30.04.98	01.09.98 - 31.12.98	16.12.98 - 31.03.99	28.01.99 - 11.03.99
Gemessener Heizwärmebedarf im Anpassungszeitraum in kWh/m ²	40,1	33,1	12,9	2,6
Prozentuale Abweichung für den simulierten Heizwärmebedarf	0,05%	0,1%	0,9%	3,5%
Abweichung im Mittelwert der Temperaturverteilung auf 15 Minuten Basis: $T_{\text{Diff}} = T_{\text{simuliert}} - T_{\text{gemessen}}$	0,0 K	0,0 K	-0,1 K	0,0 K
Standardabweichung $\sigma(T_{\text{Diff}})$	0,2 K	0,3 K	0,2 K	0,5 K

Während bei der Anpassung das Nutzerverhalten im Detail reproduziert wurde (soweit das aus den Messwerten möglich ist), kann nun zu standardisiertem Nutzerverhalten übergegangen werden. Hierzu wurden Nutzerprofile verwendet, wie sie auch im Rahmen des IEA-SHC Task 28 benutzt werden. In Tabelle 2 sind die entsprechenden Ergebnisse von Messungen und Simulationen für den Zeitraum von einem Jahr dargestellt. Die Messungen wurden von der Universität Siegen in den Jahren 1998/1999 bzw. 1997/1998 (Essen) durchgeführt. In der Simulation wurden die jeweiligen gemessenen Wetterdaten verwendet. Weiterhin wurde eine aus den Messwerten ermittelte Heizgrenztemperatur bei der Simulation benutzt. Darüber hinaus sind keine Details der tatsächlichen Nutzung in der Simulation integriert, so dass eine *exakte* Übereinstimmung von Messung und Simulation, wie bei der Anpassung, nicht zu erwarten ist. Die Abweichungen von weniger als 5%, insbesondere auch bei den Passivhäusern (Objekte 3 und 4), sind jedoch als sehr gering einzustufen. Das bedeutet, dass die Simulationsmodelle auch bei unbekanntem Details der Gebäudenutzung eine hinreichend gute Vorhersagefähigkeit besitzen.

Tabelle 2: Jahreswerte für TRNSYS-Simulation und Messung mit Standard-Nutzerprofilen.

	Objekt 1 Essen	Objekt 2 Hünsborn	Objekt 3 Hillmicke	Objekt 4 Hohkeppel
Heizgrenztemperatur (aus Messwerten)	21,5 °C	19,5 °C	20,0 °C	20,0 °C
Gemessener Heizwärmebedarf in kWh/(m ² a)	82,4	72,9	27,8	9,8
Simulierter Heizwärmebedarf in kWh/(m ² a)	79,6	75,8	26,5	9,5
Abweichung Simulation von Messung in kWh/(m ² a)	- 2,8	2,9	- 1,3	- 0,3
Abweichung Simulation von Messung	3,4%	4,0%	4,7%	3,1%

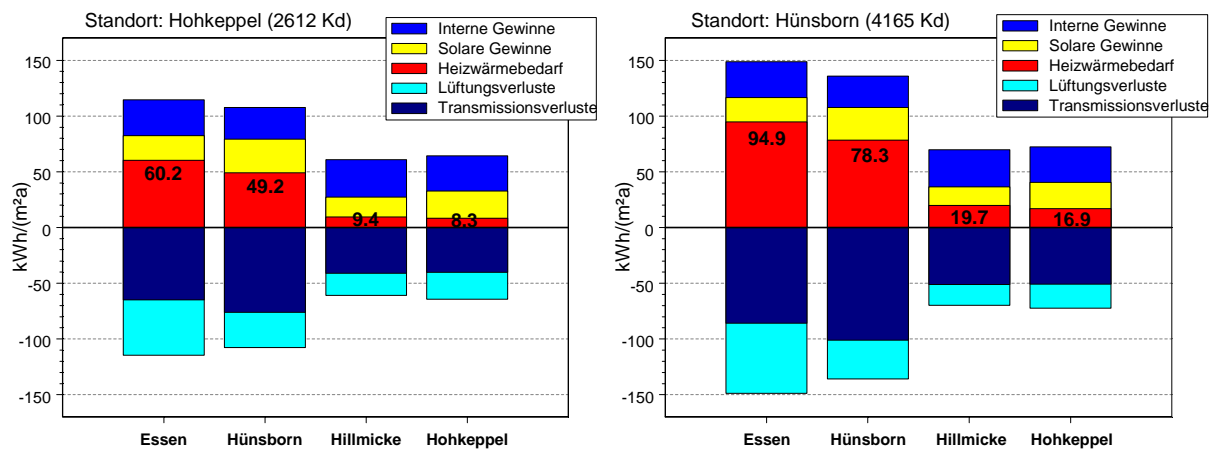


Abbildung 2: Simulationsergebnisse für die Energiebilanzen aller 4 Objekte jeweils an zwei verschiedenen Standorten. Der Heizwärmebedarf ist auch als Zahlenwert angegeben.

Arbeitsabschnitt 2 – Durchführung von Sensitivitätsanalysen

Sensitivitätsanalysen wurden für eine große Palette von Einflussgrößen durchgeführt, wie z.B. für Dämmstandard, Fensterart, Fenstergröße, Infiltration, Klimabedingungen, Solarstrahlung, Nutzerverhalten, Wärmekapazität, Orientierung, Verschattung, Heizleistung. Besonders stark ist der Einfluss des Klimas bzw. Mikroklimas auf den Heizwärmebedarf. In Abbildung 2 sind die Energiebilanzen der 4 Gebäude dargestellt. Hierbei wurden einheitliche (der Personenzahl entsprechende) interne Gewinne angenommen und die Gebäude gemäß ihrer Hauptfassade nach Süden ausgerichtet. Außerdem blieb zur besseren Vergleichbarkeit die Verschattung durch Umgebungsbebauung unberücksichtigt. Die benutzten Wetterdaten sind diejenigen, die in Hohkeppel und Hünsborn in der Heizperiode 1998/1999 von der Universität Siegen gemessen wurden. Trotz der geringen Entfernung von nur ca. 40 km zwischen Hohkeppel und Hünsborn sind an den beiden Standorten die Heizgradtage im selben Jahr um den Faktor 1,6 verschieden. Während Hohkeppel (Lindlar) noch im Einflussbereich des milden Klimas der Kölner Bucht liegt, ist Hünsborn (Wenden) dem Sauerland zuzuordnen. Der Heizwärmebedarf der beiden Passivhäuser (Objekte 3 und 4) unterscheidet sich dabei um mehr als den Faktor 2, da die gesamten Verluste in erster Näherung mit der Heizgradtagzahl skalieren, und der Unterschied im wesentlichen mit der Heizwärme ausgeglichen wird.

Für verschiedene Wandtypen wurde die Kosteneffizienz zum Dämmstandard der Hülle untersucht. Hierbei wurden die Annuität der Investitionskosten für eine U -Wert-Verbesserung der entsprechenden jährlichen Energiekosten gegenübergestellt (siehe Abschn. 6, [2]). Das Ergebnis sind die Investitionskosten in € pro eingesparte kWh Heizenergie. Dieser Wert wird den Energiekosten gegenübergestellt. Sind die Investitionskosten geringer als die Energiekosten (jeweils pro kWh) so amortisiert sich die Investition. Am Beispiel des Objekts 2 (Hünsborn) sollen hier Ergebnisse dargestellt werden. Als Dämmmaterial wurde für die Wände Mineralwolle mit Wärmeleitfähigkeit $L = 0,04 \text{ W/(mK)}$, für das Dach Mineralwolle mit $L = 0,35 \text{ W/(mK)}$ und für den Boden PUR-Schaum mit $L = 0,25 \text{ W/(mK)}$ angenommen. Die Investitionskosten steigen dabei mit abnehmender Wärmeleitfähigkeit des Materials. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für das Objekt 2 (Hünsborn) mit Wänden in Leichtbauweise. Bis zu einem U -Wert von $0,28 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ würde sich der Einsatz des Dämmmaterials bei Wänden und dem Dach amortisieren. Für höheren Dämmstandard liegen die Investitionskosten über den Energiekosten. Ab hier würde man von einer Investition ausschließlich in den Umweltschutz sprechen. Diese ist bis hin zu einem U -Wert von $0,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ aber effizienter als eine Verringerung des U -Wertes der Fenster unter den heutigen Standardwert von $1,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, oder eine Vergrößerung der Fensterfläche über das für den Lichtbedarf nötige Maß hinaus.

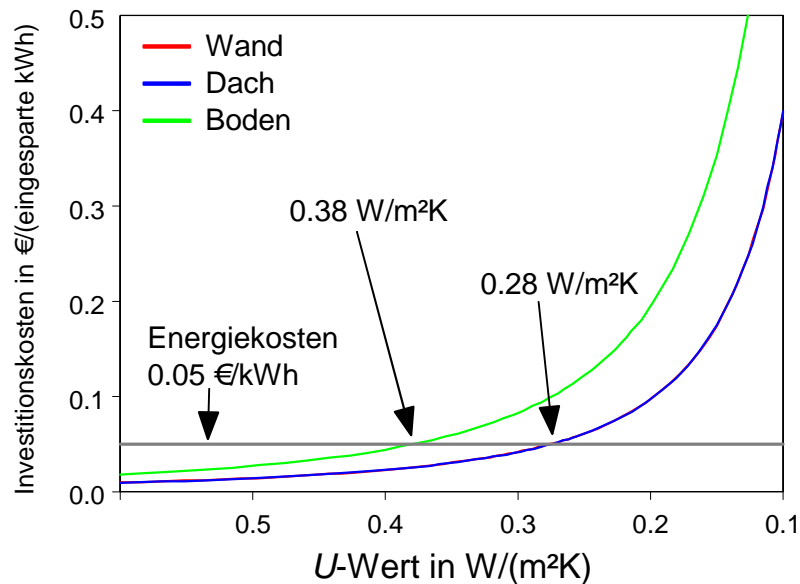


Abbildung 3: Investitionskosten für einen Zentimeter zusätzliche Dämmung, umgelegt auf die entsprechende Energieeinsparung für die Baukonstruktion des Objektes 2 (Hünsborn).

Außerdem wurden Ergebnisse zur Energie- und Kosteneffizienz von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und Erdwärmetauscher veröffentlicht (Abschn. 6, [1]). Diese beruhen auf dem Modell des Objekts 3 (Hillmicke). Als Referenzfall wurde eine reine Abluftanlage angenommen, wie sie zum hygienischen Luftwechsel in einem Niedrigenergiehaus als Minimalanlage installiert sein sollte. Energieeinsparung und Mehrkosten wurden berechnet für die Erweiterung mit einem Zuluftsystem und einer Wärmerückgewinnung (WRG) der Effektivität $e_{WRG} = 65\%$ bzw. $e_{WRG} = 90\%$. Hierbei kam jeweils ein elektrischer Defroster zur Vermeidung des Zufrierens der WRG zum Einsatz. Als weiterer Fall wurde der elektrische Defroster durch einen geeignet dimensionierten Erdwärmetauscher ersetzt. Die Ergebnisse für den Primärenergiebedarf unter Berücksichtigung des Ventilatorstroms und des Strombedarfs für den Defroster sind in Abbildung 4 dargestellt. Zusätzlich sind dort auch die Investitionskosten pro eingesparte kWh Primärenergie eingetragen. Die Ergebnisse für die Energie- und Kosteneffizienz von Lüftungsanlagen sind am Ende dieses Abschnitts zusammengefasst werden (siehe Kategorie 1, 2 und 3), und wurden unter der Annahme erhalten, dass der Primärenergiepreis mit 0,05 €/kWh über die Lebensdauer der Lüftungsanlage (ca. 20 Jahre) konstant bleibt. Bei einer Erhöhung des Energiepreises ergibt sich eine entsprechend günstigere Kosteneffizienz.

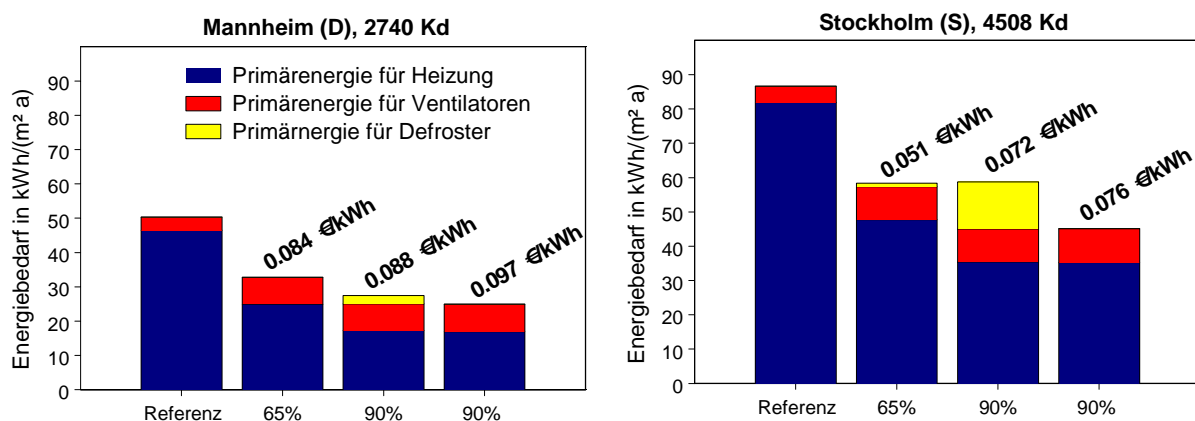


Abbildung 4: Simulationsergebnisse für den Primärenergiebedarf des Objekts 3 mit vier verschiedenen Auslegungen der Lüftungsanlage. Diese sind von links nach rechts: 1) Reine Abluftanlage (Referenzfall); 2) Zu- und Abluftanlage mit 65% Wärmerückgewinnung (WRG) und elektrischem Defroster; 3) wie 2), jedoch mit 90% WRG; 4) Zu- und Abluftanlage mit 90% WRG und Erdwärmetauscher als Ersatz für den elektrischen Defroster.

Zum Thema der Effizienz von passiv solaren Gewinnen in Niedrigenergiehäusern wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Dazu wurden jeweils monatliche Werte für den Nutzungsgrad der durch Fenster erhaltenen passiv solaren Gewinne ermittelt. Die Berechnung beruht auf zwei separaten Simulationen für jeden Monat, mit jeweils mehreren Wochen Vorlauf zur Ausschaltung des Einflusses der Anfangsbedingungen. Bei der ersten Simulation werden für den Monat Nr. m der Heizwärmebedarf $H_0(m)$ und die solaren Gewinne $S_0(m)$ berechnet. In einer zweiten Simulation werden unter sonst identischen Bedingungen für den selben Monat Nr. m die direkte und diffuse Strahlung auf alle transparenten Flächen (d.h. für die Glasanteile der Fenster) reduziert bzw. auf Null gesetzt. Die Solarstrahlung auf die opake Hülle, einschließlich der Fensterrahmen, wird dabei nicht verändert. Der resultierende Heizwärmebedarf und die solaren Gewinne betragen nun $H_1(m)$ und $S_1(m)$. Der Nutzungsfaktor ist dann gegeben als:

$$\mathbf{h}(m) := \frac{\Delta H(m)}{\Delta S(m)} \equiv \frac{H_1(m) - H_0(m)}{S_0(m) - S_1(m)} \leq 1,$$

wobei m über alle Monate der Heizperiode läuft (i.d.R. September bis Mai). Für eine vollständige Unterdrückung der solaren Gewinne mit $S_1(m) = 0$ sind die nutzbaren solaren Gewinne gegeben durch $S_n(m) = \mathbf{h}(m) \cdot S_0(m) = H_1(m) - H_0(m)$. Diese Größe gibt die durch die solaren Gewinne verursachte Reduzierung des Heizwärmebedarfs an. Ergebnisse für den solaren Nutzungsgrad $\mathbf{h}(m)$ sind in Abb. 5 dargestellt.

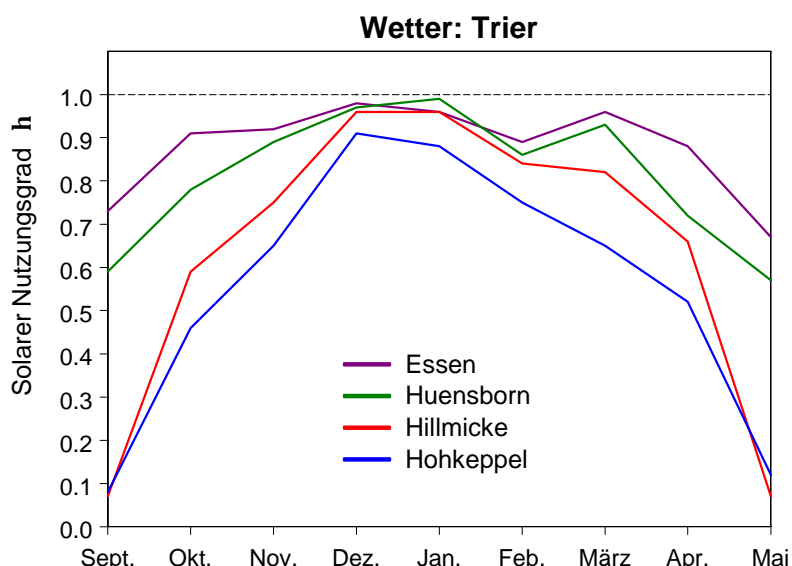


Abbildung 5: Simulationsergebnisse für den monatlichen solaren Nutzungsgrad in den Objekten 1 bis 4. Die benutzten Wetterdaten wurden mit METEONORM für den Standort Trier erzeugt. Die beiden Passivhäuser (Hillmicke, Hohkeppel) zeigen gegenüber den Niedrigenergiehäusern (Essen, Hünsborn) einen geringeren solaren Nutzungsgrad.

Um den Zusammenhang von Heizwärmebedarf und nutzbaren solaren Gewinnen zu verdeutlichen, wurde der U -Wert der Gebäudehülle von Objekt 1 (Essen) sukzessive erniedrigt (bzw. erhöht). Dies ist durch Variation der Dämmstoffschichtdicke und der Wärmerückgewinnungsgrades der Lüftungsanlage erreicht worden. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt. Zur Erreichung eines Heizwärmebedarfs von nur 9 kWh/(m² a) wurden hochwärmedämmende 3-Scheiben-Fenster mit einem niedrigeren g -Wert verwendet. Dadurch sind die solaren Gewinne reduziert. Bei allen anderen Varianten sind die Fenster nicht variiert worden. Der nutzbare Teil der solaren Gewinne fällt mit zunehmendem Dämmstandard bzw. kleiner werdendem Heizwärmebedarf stark ab. Liegen die nutzbaren solaren Gewinne in der Heizperiode bei einem schwachen Dämmstandard noch bei ca. 20 kWh pro m² Wohnfläche, so reduziert sich dieser Wert auf etwa 10 kWh pro m² Wohnfläche bei einem Passivhausstandard. Der nicht nutzbare, potenziell Überhitzung verursachende Teil der solaren Gewinne erhöht sich entsprechend.

Varianten des Gebäudemodells Essen — Zeitraum: Sept. bis Mai

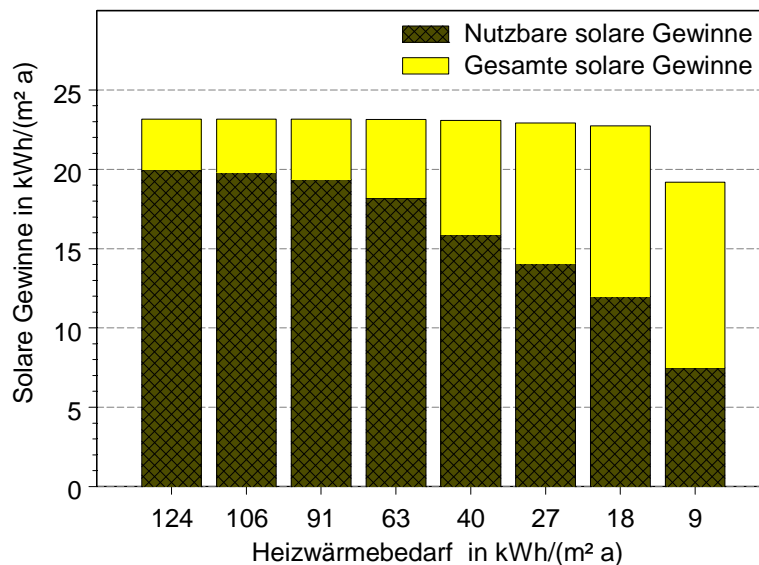


Abbildung 6: Nutzbare und solare Gewinne im Objekt 1 (Essen) für verschiedene Dämmstandards der Hülle unter sonst gleichen Bedingungen, aufgetragen über dem Heizwärmebedarf. Für die Variante mit einem Heizwärmebedarf von 9 kWh/(m² a) wurden hochwärmedämmende 3-Scheiben-Fenster mit einem niedrigeren g-Wert verwendet. Dadurch sind die solaren Gewinne gegenüber den anderen Varianten reduziert. Für den Wetterdatensatz wurde der Standort Trier verwendet.

Als Ergebnis kann zunächst festgestellt werden, dass sich bei geringem Heizwärmebedarf (z.B. Passivhaus) die Aufteilung der solaren Gewinne auf nutzbaren Anteil und potenziell Überhitzung verursachendem Anteil ungünstig verlagert. Passivhäuser sollten daher nicht auf maximale passive Gewinne hin optimiert werden. Vielmehr sollte die Fensterfläche unter den Aspekten optimaler Tageslichtnutzung, guter Aussicht und geringer Kosten festgelegt werden.

Arbeitsabschnitt 3 – Modellerweiterung durch innovative Regelung und solare Komponenten

Das Modell des Objekts 3 (Passivhaus Hillmicke) wurde für eine solar unterstützte Raumheizung erweitert. Dazu wurde je ein separater Tank für Brauchwasser und Heizung modelliert. Die Brauchwassertemperatur beträgt 50 °C, während als Vorlauftemperatur für die Heizung 40 °C gewählt wurde. Die Regelung der Anlage sieht vor, dass der Solarkollektor seine Wärme jeweils an den Tank mit der niedrigsten Temperatur abgibt. Dadurch wird ein Betrieb der Kollektoranlage mit möglichst hohem Wirkungsgrad erreicht.

Erste Ergebnisse der Simulationen für die solar unterstützte Heizungsanlage zeigt Abb. 7. Abhängig von der Kollektorfläche, die zwischen 0 bis 40 m² variiert, ist der Primärenergiebedarf (d.h. der um den Faktor 1,1 erhöhte Energiebedarf) für Heizung und Brauchwasser dargestellt. Außerdem enthält die Abbildung den Strombedarf für die Pumpe der Solaranlage (Primärenergiefaktor 2,7). Die Simulationen wurden für das Objekt 3 (Passivhaus in Hillmicke mit 204 m² Wohnfläche) mit METEONORM-Wetterdaten für den Standort Trier durchgeführt. Der gesamte Primärenergiebedarf fällt durch Nutzung einer Solaranlage mit 10 m² Kollektorfläche um 10,5 kWh pro m² Wohnfläche und Jahr ab. Weitere 30 m² Kollektorfläche würden den Primärenergiebedarf nur um zusätzlich ca. 5 kWh pro m² Wohnfläche und Jahr reduzieren. Zwar steigt der solare Deckungsgrad des Primärenergiebedarfs mit zunehmender Kollektorfläche, jedoch fällt der solare Nutzungsgrad und damit die Energieeffizienz mit zusätzlichen Quadratmetern Kollektorfläche stark ab.

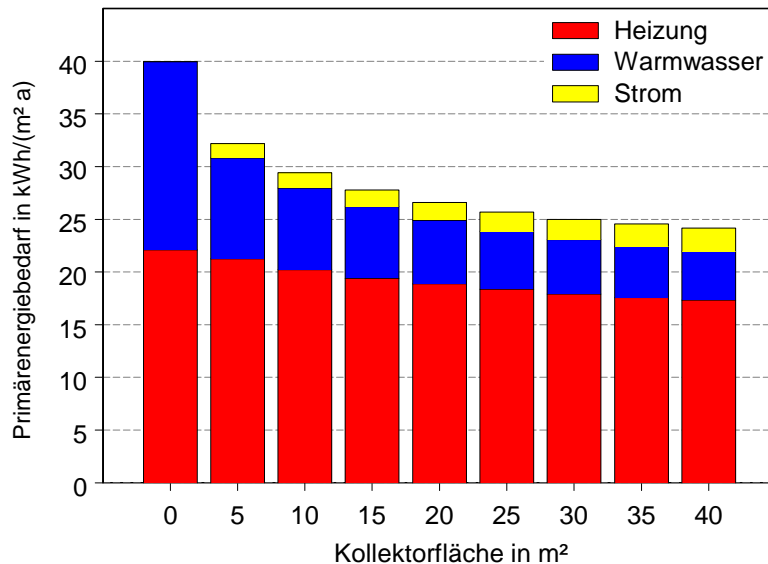


Abbildung 7: Jährlicher Primärenergiebedarf einer solar unterstützten Brauchwarmwasser- und Heizungsanlage basierend auf einem Gas-Brennwertkessel in Abhängigkeit von der installierten Kollektorfläche. Der angegebene Strombedarf bezieht sich auf die Solaranlage. Grundlage ist das Objekt 3 (Passivhaus Hillmicke) mit METEONORM-Wetterdaten für den Standort Trier.

Schon ab einer Kollektorfläche von 10 m² liegen die Kosten der Kollektoranlage nahezu konstant bei ca. 600 €/m². Aus Sicht der Kosteneffizienz sind daher Anlagen bis zu dieser Größe für Zweifamilienhäuser zu bevorzugen. Das hier berechnete Beispielgebäude wird von 6 Personen genutzt. Das bedeutet, dass nach derzeitigem Stand der Analysen unter Berücksichtigung von Energie- und Kosteneffizienz die Kollektorgröße der Solaranlage für Brauchwasser und Heizungsunterstützung im Bereich von 1,5 m² bis 1,8 m² pro Person gewählt werden sollte.

Als weitere Systemerweiterung wurden Luft-Wasser-Wärmepumpen betrachtet. Die Grundlage dazu bilden Felduntersuchungen des Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrums Winterthur-Töss, Schweiz. Die im WPZ-Bulletin Nr. 22 veröffentlichten Ergebnisse wurden benutzt, um ein TRNSYS-Modul zu entwickeln, das die Leistungszahlen (COP) verschiedener Wärmepumpen in Abhängigkeit der Wärmequellen- und Vorlauftemperatur widerspiegelt.

Gleichermaßen wie die Untersuchungen zu Solaranlagen, konnten die Berechnungen zu Wärmepumpen zunächst nur für wenige Randbedingungen durchgeführt werden. Allgemeine Aussagen können deshalb daraus noch nicht abgeleitet werden. Andere Untersuchungen stützen sich jedoch schon auf intensivere Berechnungen, so dass für diese Maßnahmen eine vorläufige Rangliste bezüglich der Energie- und Kosteneffizienz angegeben werden kann. Die verschiedenen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in den hier betrachteten Gebäudearten lassen sich in vier Kategorien einteilen:

Kategorie 1: Maßnahmen, welche zu geringen bis moderaten Energieeinsparungen führen und keine Kosten verursachen:

- I. Kompakter Gebäudeentwurf.
- II. Orientierung der Fensterfläche nach Süden, um solare Gewinne zu erhöhen. (Bei Passivhäusern besteht hierbei jedoch ein potenzielles Überhitzungsproblem).

Kategorie 2: Maßnahmen bei welchen die Investitionskosten innerhalb der Lebensdauer durch Energieeinsparung ausgeglichen werden können:

- I. Zusätzliche Dämmung der opaken Gebäudehülle bis zu ca. $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ bei den typischen Wetterbedingungen von Deutschland (ca. 3500 Kd).
- II. Lüftungssysteme in kälteren Klimata ($> 4000 \text{ Kd}$) mit moderaten, nicht ambitionierten Wärmerückgewinnungsgraden ($\approx 65\%$).

Kategorie 3: Maßnahmen, welche zu signifikanten Energieeinsparungen führen, die sich dadurch in der Regel jedoch nicht refinanzieren:

- I. Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung in milderen Klimata ($< 4000 \text{ Kd}$).
- II. Zusätzliche Dämmung der opaken Hülle mit U -Werten niedriger als $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ bis hin zu $U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Kategorie 4: Maßnahmen mit moderaten Energieeinsparungen, die aber sehr hohe Kosten verursachen:

- I. Vergrößerung der Fensterfläche nach Süden mit Fenstern gemäß aktuellem Standard ($1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \leq U \leq 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$) über das für Tageslicht und gewünschtes Sichtfeld nötige Maß hinaus.
- II. Hochwärmedämmende Fenster, welche den aktuellen Standard bei weitem übertreffen, d.h. Fenster mit $U = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ statt $U = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.
- III. Erdreichwärmetauscher, welche in milden Klimata ($< 4000 \text{ Kd}$) nur dazu genutzt werden in der Heizperiode Frischluft vorzuwärmen.

Arbeitsabschnitt 4 – Aufbereitung ausgewählter Ergebnisse für den IEA-SHC

Task 28

Auf den Arbeitstreffen des IEA-SHC Task 28 wurden Textbeiträge zum geplanten Handbuch vorgestellt und diskutiert sowie Auszüge der oben dargestellten Simulationsergebnisse präsentiert. Darüber hinaus wurden Simulationen für die im Rahmen des IEA-SHC Task 28 definierten Reihenhäuser durchgeführt. Diese Ergebnisse haben gezeigt, wie für vorgegebene Reihenhaustypen in kaltem und mittlerem Klima über jeweils eine konservative und passiv-solare Strategie der Passivhausstandard erreicht werden kann. Die Beiträge zu den Simulationen im IEA-SHC Task 28 wurden entsprechend der gemeinsam entwickelten Anforderungen mehrfach modifiziert und ergänzt. Die Ergebnisse liegen in Form eines 14-seitigen Berichts vor. Vom 6. bis 7. Oktober 2003 hat in Wallisellen, Schweiz, ein Workshop zum Thema Simulationen stattgefunden, auf dem auch die Universität Siegen vertreten war. Der endgültige Inhalt und das Format des Simulations-Kapitels im geplanten Handbuch wird Mitte 2004 festgelegt.

4 Unterauftrag „Solarenergienutzung in Häusern mit sehr niedrigem Heizenergiebedarf“

An das Ingenieurbüro Morhenne GbR, Wuppertal, wurde ein Unterauftrag vergeben. Die Laufzeit des Unterauftrags ist gleich mit der des Hauptprojekts. Ein Arbeitsschwerpunkt des IB Morhenne liegt in der Untersuchung von aktiven solaren Komponenten für die Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung. Hierzu wurden sehr detaillierte Simulationsmodelle zur Beschreibung der Haustechnik entwickelt. Die oben beschriebenen 4 Objekte aus dem Projekt „Energetische Diagnose“ sind freistehende Gebäude. Zur Ergänzung des Gebäudespektrums untersucht das IB Morhenne insbesondere Reihenhäuser. Beim Vergleich des Einsatzes solarer Komponenten mit anderen Maßnahmen zur Heizenergieeinsparung findet die Kosteneffizienz eine besondere Berücksichtigung. Teilergebnisse des IB Morhenne, wie z.B. Modelle von Komponenten für Solaranlagen, Kostenerhebungen und Nutzerprofile sind von der Universität Siegen in den oben beschriebenen Arbeiten eingesetzt worden. Ebenso wurden dem IB Morhenne die von der Universität Siegen entwickelten Simulationsmodule und aufbereitete Datensätze zur Verfügung gestellt. Teil des Unterauftrages sind auch Beiträge zum IEA-SHC Task 28. Innerhalb des „Sub-Task B“ sind 18 beispielhafte Gebäudetypen definiert worden, die mit Hilfe von Computersimulationen bezüglich des Energiehaushalts untersucht werden. Jeweils 2 dieser 18 Simulationsaufgaben werden vom IB Morhenne und der Universität Siegen übernommen. Das IB Morhenne stellt die konkreten Ergebnisse des Unterauftrags in gesonderten Berichten gegenüber der AG Solar NRW dar.

5 Interpretation des Standes der Arbeiten

Mit den kalibrierten Gebäudemodellen und den bislang entwickelten Erweiterungen innerhalb der sehr flexiblen Simulationsumgebung TRNSYS steht nunmehr eine sehr gute Basis zur Untersuchung verschiedener Maßnahmen zur Verfügung. Die Palette der Möglichkeiten wurde im vorliegenden Zwischenbericht beispielhaft dargestellt. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass sich für eine Vielzahl von Maßnahmen sehr differenzierte Ergebnisse erzielen lassen, die deutlich über eine positiv/negativ-Klassifizierung hinausgehen. Die gleichzeitige Berücksichtigung von Energie-, Kosten- und Komfortkriterien erlaubt die Erstellung einer insbesondere für die Praxis relevanten Rangliste von Energiesparmaßnahmen.

6 Veröffentlichungen

- [1] U.D.J. Gieseler, W. Bier, F.D. Heidt: *Cost efficiency of ventilation systems for low-energy buildings with earth-to-air heat exchange and heat recovery*, Proc. of the Intern. Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Toulouse (2002), pp. 577-583.
- [2] U.D.J. Gieseler, F.D. Heidt, W. Bier: *Evaluation of the cost efficiency of an energy efficient building*, Renewable Energy Journal (2003), vol. 29, pp. 369-376.
- [3] W. Bier, *Untersuchung von Gebäuden mit sehr niedrigem Heizwärmebedarf – validierte Modellierung zur thermischen Simulation*, Diplomarbeit, Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie, Universität Siegen, Dezember 2002.
- [4] U.D.J. Gieseler, W. Bier, F.D. Heidt: *Combined thermal measurement and simulation for the detailed analysis of four occupied low-energy buildings*, Proceedings of the 8th Intern. IBPSA Conf., Building Simulation, Eindhoven (2003), vol. 1, pp. 391-398
- [5] U.D.J. Gieseler, F.D. Heidt: *Solar utilization in low-energy buildings*, Proc. of the 5th ISES Europe Solar Conference, Freiburg (2004), in Vorbereitung.